

Kocaeli Yarımca RO-RO Limanı'ndaki Çakma Kazıkların Zamanla Taşıma Kapasitesi Artışlarının İncelenmesi

Mehmet İNCE^{1*}, Ahmet KARAKAŞ², Özkan CORUK³, Ozan YÜKSEL⁴

Öz

Çakma kazıkların yük taşıma kapasitesi zamanla değişir ve bu değişim, 'direnç artışı' ve 'direnç azalışı' olarak incelenir. Bu olgular genellikle aşırı boşluk suyu basıncının dağılmasıyla ilişkilidir. Kazık/zemin direnç artışı, kazık derinlik-çap oranı, geçen zaman ve zemin türü gibi faktörlere bağlıdır. Maksimum kapasite artışını değerlendirmek için ilk kapasite ölçümü çakma işleminden hemen sonra, ikinci ölçüm ise mümkün olduğunca ileri bir zamanda yapılır. Yarımca Ro-Ro Limanı inşaatında, proje teknik şartnamelerine ve ilgili standartlara uygun olarak 436 kazık çakılmış ve %100 dinamik test ile taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. 24 kazıkta tekrar çakım yapılarak kapasite artışı gözlemlenmiştir. İlk ve tekrar çakım sonuçları, geçen zaman ve zemin koşullarının etkileri analiz edilmiştir. Kazık kapasite artış oranları 1.46 ile 3.41 arasında değişim göstermektedir. Toplam taşıma kapasitesi artışında, çevre sürtünme direncinin uç direncinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kapasite artışları ile tekrar çakım zaman aralığı arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır. Kazıklarda zamanla kapasite değişimi, farklı araştırmacılar tarafından özellikle direnç artışı üzerine yoğun çalışmalarla incelenmekte ve kapasite artış faktörlerinin denetlediği bağıntılar geliştirmeye çalışılmaktadır. Ancak, henüz ortak görüş birliğiyle oluşturulmuş ve standardize edilmiş bir bağıntıya ulaşılamamıştır. Tekrar çakım ile kazık kapasitesindeki artışın projeye dahil edilmesi, kazık uzunlukları ve çakma ekipman kapasitesinin azaltılması gibi proje maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Vaka analizi ve veri paylaşımı ile bu alanda yapılmakta olan çalışmalara katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

Anahtar Kelimeler: Çakma Kazık, Kazık Kapasite Artışı, Kazık Taşıma Kapasitesi, Pile Dinamik Test.

Investigation of the Time-Dependent Increase in Bearing Capacity of Driven Piles at Kocaeli Yarımca RO-RO Port

Abstract

The load-bearing capacity of driven piles changes over time, and this change is investigated as 'set-up' (resistance increase) and 'relaxation' (resistance decrease). These phenomena are generally associated with the dissipation of excess porewater pressure. Pile/soil resistance increase depends on factors such as pile depth-to-diameter ratio, elapsed time, and soil type. To assess the maximum capacity increase, the first capacity measurement is conducted immediately after pile driving, while the second measurement is taken as late as possible. During the construction of the Yarımca Ro-Ro Port, 436 piles were driven in accordance with the project's technical specifications and relevant standards, and their load-bearing capacities were determined using 100% dynamic testing. Capacity increases were observed in 24 piles after restriking. The results of the initial and re-driving tests were analyzed in terms of elapsed time and soil conditions. The rate of pile capacity increase ranged from 1.46 to 3.41. It was found that the increase in total load-bearing capacity was primarily due to skin friction, which was greater than end-bearing resistance. A significant relationship between capacity increases and the interval between re-driving could not be established. The time-dependent capacity changes in piles are a focus of intensive studies, particularly on resistance gain, with researchers striving to develop correlations controlled by capacity increase factors. However, a standardized correlation has not yet been reached with consensus. Including the increase in pile capacity from re-driving in the project could contribute to cost reduction by minimizing pile lengths and driving equipment capacity. It is inevitable that case studies and data sharing will contribute to ongoing research in this field.

Keywords: Driven Pile, Pile Set-Up, Pile Bearing Capacity, Pile Dynamic Testing.

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, mehmetince18966@gmail.com

^{2,3}Kocaeli Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, akarakas@kocaeli.edu.tr coruk@kocaeli.edu.tr

⁴ECAP Mühendislik ve Müşavirlik AŞ, İnşaat Mühendisi, İstanbul, Türkiye, ozan.yuksel@stfa.com

1. Giriş

Kara ve denizdeki kritik yapılarda, genellikle fore kazık ve çakma kazıklar olarak sınıflandırılan kazık temelleri üzerine oturtulur. Kazıklar, temelde sütun şeklindeki elemanlar olup üst yapıdan gelen yükleri, zayıf ve sıkıştırılabilir tabakalar yoluyla daha sert, daha yoğun ve daha az sıkıştırılabilir zeminlere ya da kayaya aktarma işlevi görür. Yüksek yapıları desteklemek için kullanıldıklarında, rüzgâr veya dalga kaynaklı çekme yüklerini de taşıyabilirler. Deniz yapılarında, yanaşan gemilerin ve dalgaların yatay etkilerine maruz kalırlar. Ayrıca, istinat duvarları, köprü ayakları ve makine temellerini desteklerken dikey ve yatay yükleri taşırlar. Fore kazık, zorlu çakma koşullarında veya ayrılmış kaya ve blokların olduğu ortamlarda ekonomik bir inşaat yöntemi olarak tercih edilir. Gevşek kohezyonsuz zeminlerde (kumlar ve çakıllar) ise çakma kazıklar tercih edilir (Tomlinson, 1986). Rıhtım, çelik boru kazıklarla desteklenecek şekilde tasarlanmıştır. Rıhtım ve arkasındaki dolgu alanı, kazıklı platformun altında, denize doğru eğimli bir anroşman mendireği ile tamamlanmıştır. Geoteknik ve temel mühendisliği kapsamında, zemin etüdü sonuçlarının incelemesi, zemin koşulları ve formasyonların belirlenmesi, tasarım için zemin modellerinin oluşturulması, kazık taşıma kapasite hesaplamaları, düşey yükler altında kazık oturma analizi (t-z ve Q-z eğrileri), zeminin yanal tepkisi (p-y eğrileri) ve şev stabilite analizleri yapılmıştır.km

Gevşek kumlarda veya yumuşak kil tabakalarında çakma işleminin sonunda kazığın taşıma kapasitesinin uzun vadeli taşıma kapasitesinden önemli ölçüde daha düşük olduğu gözlenmiştir. Kazık çakma süreci ve sonrasında, kazığın çevresindeki zeminin dayanıklılığı, boşluk suyu basıncının artması ve zemin yapısının yeniden şekillenmesi nedeniyle azalır. Zamanla, zemin genellikle ilksel dayanıklılığını büyük ölçüde geri kazanır ve dolayısıyla kazığın kapasitesi artar. Bu olaya "kazık direncinde artış" veya "set-up" adı verilebilir. Sıkı kumlarda ve sert kil ortamlarda, çakma kazıkların başlangıçta sahip olduğu taşıma kapasitesinin uzun vadeli kapasitesinden genellikle daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni zemin ortamında negatif boşluk suyu basıncının gelişmesi olup, bu da efektif gerilmeyi artırır ve dolayısıyla zeminin kayma direncini yükseltir. Negatif boşluk suyu basıncı zaman içinde azalır ve kazık kapasitesinde azalmaya neden olur. Bu kazık kapasitesindeki azalmaya "direncin azalması" veya "relaxation" denir (Sawant ve ark., 2013).

Bu bilinen gerçeklere rağmen, kazık tasarımlarında kazık direnç artışını hesaba katmaktan kaçınmak yaygın bir uygulamadır. Halbuki daha az sayıda, daha kısa veya daha küçük çaplı kazıklarla ekonomik avantajlar elde edilebilir. Literatür incelemelerinde direnç artışı olayının en çok üzerinde araştırma yapılan konu olduğu gözlenmektedir. Kazık zemine çakıldığı zaman, kazık çevresindeki zemin çoğunlukla radyal yönde yer değiştirirken, kazık ucundaki zemin hem dikey hem de radyal yönde yer değiştirir. Killi zeminlerde kazık çakma işlemi, yaklaşık olarak $\sim 10D$ (D kazık çapı) uzaklığa kadar olan zemin dayanımını önemli ölçüde değiştirir (Randolph ve ark., 1979). $\sim 0.5D$

mesafesi içindeki zemin tamamen yeniden şekillenirken, $\sim 1.5D$ mesafesinde sıkışabilirlik artmaktadır (Yang, 1970). Kazık çevresinde ve ucunda yer değiştiren ve örselenen zeminde oluşan aşırı gözenek suyu basıncı, efektif gerilmeyi azaltır. Aşırı boşluk suyu basınç artışı derinlikle değişmemektedir (Soderberg, 1961). Kazıktan uzaklaştıkça, aşırı boşluksuyu basıncında kazıktan olan mesafenin karesiyle ters orantılı olarak bir azalma meydana gelir. Gözenek suyu basıncının dağılması için geçen süre, kazık çapının karesi ile orantılıyken, zeminlerin radyal konsolidasyon katsayısının tersi ile orantılıdır (Pestana ve ark., 2002). Bu nedenle, büyük çaplı kazıklar için direnç artışı gelişimi küçük çaplı kazıklardan daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Aşırı gözenek suyu basıncının dağılmasıyla birlikte zemin efektif gerilmeleri artar ve direnç artışı, çoğunlukla kazığa karşı yanal gerilme nedeniyle artan kayma mukavemetinin bir sonucu olarak meydana gelir. Bu durum, aşırı gözenek suyu basıncının oluşması ve dağılmasının genellikle kazık gövdesi boyunca gerçekleştiğini gösterir. Bu nedenle, direnç artışı çevre sürtünme direncindeki artışa dayandırılır ancak asıl olan çevre sürtünme direncindeki artış değil zemin dayanımındaki artıştan kaynaklıdır (Sawant ve ark., 2013).

Granüler zeminlerde kazıklı radye temelin yük paylaşım oranı, dikey gerilme artışları, optimum kazık aralıkları, dikey yüke maruz kalan tekil kazığın davranışı, kohezyonsuz zemine gömülü çakılan kazıkların grup verimliliği, gevşek kumlu zeminde radye temellerin taşıma kapasitesi ve oturma üzerine kazık eklenmesi ve uzunluğunun incelenmesi gibi konularda geoteknik mühendisliğine önemli katkılar sunan deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmaktadır (Ateş ve Şadoğlu, 2022a; Ateş ve Şadoğlu, 2023; Ateş ve Şadoğlu, 2022b; Ateş ve Şadoğlu, 2021a; Ateş ve Şadoğlu, 2021b; Ateş ve Şadoğlu, 2021c). Çok amaçlı tasarımı ve optimizasyonu ile son yıllarda kullanılmaya başlanan sıkıştırma kazıkları (squeezed branch piles), doygun kil zeminindeki kazıklı radye temel modellerinde kazık düzeninin uzun dönem çökme ve yük dağılımı üzerindeki etkisi, PLAXIS 2D ve GEO5 sonlu eleman yazılımları kullanarak kazık grubu, kazıklı radye ve temelin sayısal analizi konularında araştırmalar yapılmaktadır (Wang ve ark., 2023; Hoang ve ark., 2024; Chimdesa ve ark., 2023).

Kumlu ve killi zeminler için gerçekleşen mekanizma birbirinden farklıdır. Kumlu zeminlerde kazık çakma işlemi nedeniyle oluşan aşırı gözenek suyu basıncının dağılması görece daha iri daneli zemin sayesinde sadece birkaç saat sürebilir ve sadece kısa vadeli bir direnç artışı etkisi yaratır ve bunun tasarıma kabullerine bir etkisi yoktur. Kumlu birimlerde uzun vadeli kapasite değişimleri, diğer nedenler bakımından hala önemli olabilir. Kil, çok düşük hidrolik iletkenliğe sahip olduğu için, kazık çakma işlemi sonrasında kazığın çevresindeki zeminde aşırı gözenek suyu basınçları ortaya çıkar. Zamanla, bu fazla gözenek suyu basıncı azalır ve efektif zemin gerilmeleri artar. Kilde kazık direnç artışının başlıca nedeni fazla gözenek suyu basıncının dağılmasıdır. Bu, kil tabakasındaki efektif gerilmenin artmasına, dolayısıyla kazığın çevre sürtünme ve uç direncinin artmasına neden olur. Aşırı gözenek suyu basınçlarının tamamen dağılmasının ardından, geçen zamana bağlı olarak sabit efektif gerilmelerde ek direnç artışı meydana gelebilir (Basu ve ark., 2009).

Ülkemizde, özellikle uluslararası projelerde dinamik test kullanımı, çakımla eş zamanlı olarak kazık taşıma kapasiteleri, kazık üzerindeki gerilmeler ve çakım seti fonksiyonlarının kontrolü gibi avantajlar nedeniyle artmaktadır. Statik testlere göre dinamik testler performans değerlerine daha hızlı erişim imkânı sunar.

Zaman içinde yapılacak tekrar çakım testleri, kapasite değişimini kayıt altına alabilir ve kazığın çakıma karşı direncindeki artışı belgeleyebilir. Başlangıç çakımı ve yeniden çakım testlerinde, güvenli bir şekilde tam kapasiteyi harekete geçirebilen uygun çakım ekipmanı kullanılmalıdır. Penetrasyon direnci her bir inçte 10 vuruşun üzerinde olduğunda, kapasitenin tam olarak harekete geçirilmediği ve dinamik izleme sonuçlarının tam kapasiteyi alt sınıra daha yakın tahmin ettiği düşünülmektedir (Komurka ve ark., 2003).

Literatürdeki vakaların genel değerlendirmesini yapan bazı araştırmacılar, kumlu zeminlerde açık uçlu çelik kazıkların aksel taşıma kapasitesi artışlarının %60 ile %20 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Kum zeminlerde uygulanan açık uçlu çelik kazıklarda çakım sonrası takip eden 100 gün için yaklaşık 1.5 kat minimum kapasite artışı faktörü tespit edildiği ifade edilmiştir. Bu, çoğunlukla aksel yüke maruz kalan kazıklar için geçerlidir (Ahlinhan ve Adjovi, 2020). Ciavaglia (2017) tarafından yapılan model denemelerinin sonuçları, nihai çevre sürtünme direncinin ölçüm öncesinde gerçekleşen yatay yüklemeler tarafından etkilenebileceğini göstermiştir. Nihai yan direncin %10'una kadar olan yatay yüklerin uygulanması, aksel kazık direncini etkilemezken, nihai yatay direncin %50'sine ulaşan yatay yükler, önceden yatay yüklemesi olmayan bir kazığa göre nihai çevre sürtünme direncinde %65 azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.

Zamanla meydana gelen kapasite artışı miktarı, ilk kazık çakımından sonra çeşitli zamanlarda tekrar çakım testleri yaparak belirlenebilir. Ancak, kohezif zeminlerde çakılan kazıkların kapasite artış miktarının, iri taneli zeminlerdeki kapasiteden daha fazla olması beklenir. Zemin türü, kazık türü ve yan sürtünme ile uç taşıma kapasite dağılımının etkilerini daha anlamlı hale getirmek için daha detaylı çalışma yapılmalıdır (Stuart, 2015). Seed ve Reese (1955) çakılan bir kazığın etrafındaki yumuşak kilde zamanla belirgin değişikliklerin, kazık geometrisi, kazık duvarının pürüzlülüğü, çakım yöntemi, tabakalaşma ve kilin özelliklerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Çevre sürtünme direncindeki kazık aksel kapasitesini kontrol eden kilin, yerinde zemin özelliklerinden önemli ölçüde farklı olduğuna ulaşmışlardır. Çalışma sonuçları, ilk çakım sonrası kapasite artışının başladığını ve 23 gün sonra tam kapasitenin elde edildiği hızlı bir kapasiteye ulaşıldığını göstermiştir.

Lee ve ark. (2019) kazık/zemin direnç etkisinin, zamanla kazık taşıma kapasitesinin arttığı bir olgu olduğunu, ancak genellikle belirsizlikler ve bu etkiye katkıda bulunan mekanizmaların yetersiz oluşu kabulü nedeniyle pratikte nadiren dikkate alındığını ifade etmiştir. Literatür taramaları üzerinde 2,219 adet saha deneyi analiz edilmiştir. Derlenen verilerin yaklaşık %80'i, kazık kapasitesinin logaritmik zaman döngüsü başına 1.150-1.875 kat arttığını göstermektedir. Geoteknik bilim alanında

yeni bir ilgi alanı olan, ilk çakımdan bir süre sonra tespit edilen kazık yük taşıma kapasitesinin ana faktörleri tam olarak ortaya konmuş ancak formüle edilmiş değildir. Bu tür çalışmaların yoğun olduğu ülkelerde, kapasite artışını destekleyen zemin faktörlerini tespit etmek amacıyla zemin araştırma çalışmalarına ilave olarak saha testleri de talep edilmeye başlanmıştır. Bu konuda yapılan ciddi projelerde, sınırlı bilgi ve tecrübelerle birlikte, kazık boyu, çapı ve çakım ekipmanlarında revizyonlar yapılarak kapasite artışları tahmin edilmekte ve maliyetlerin düşürülmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, Kocaeli-Yarımca RO-RO liman sahasının genel jeolojik durumu, bölgelere ayrılmış ideal zemin şartlarına göre kazık geoteknik kapasiteleri, dinamik test yöntemi ve bu yöntemle tekrar kazık çakımlarıyla tespit edilen kazık yük taşıma kapasite artışları incelenmiştir. Çalışmada, vaka analizi olarak zamanla kazık yük taşıma kapasite artışlarını analiz ederken, dinamik test sonuçlarına göre tüm kazıklarda kapasite artışlarının nedenleri de incelenmektedir.

2. Araştırma Alanı Konumu ve Jeolojisi

Proje sahası Kocaeli ili Körfez ilçesi sınırlarında ve İzmit Körfezi'nin batısında yer alan Yarımca'da bulunmaktadır. Proje ve araştırma alanı lokasyonu Şekil 1'de görülmektedir.



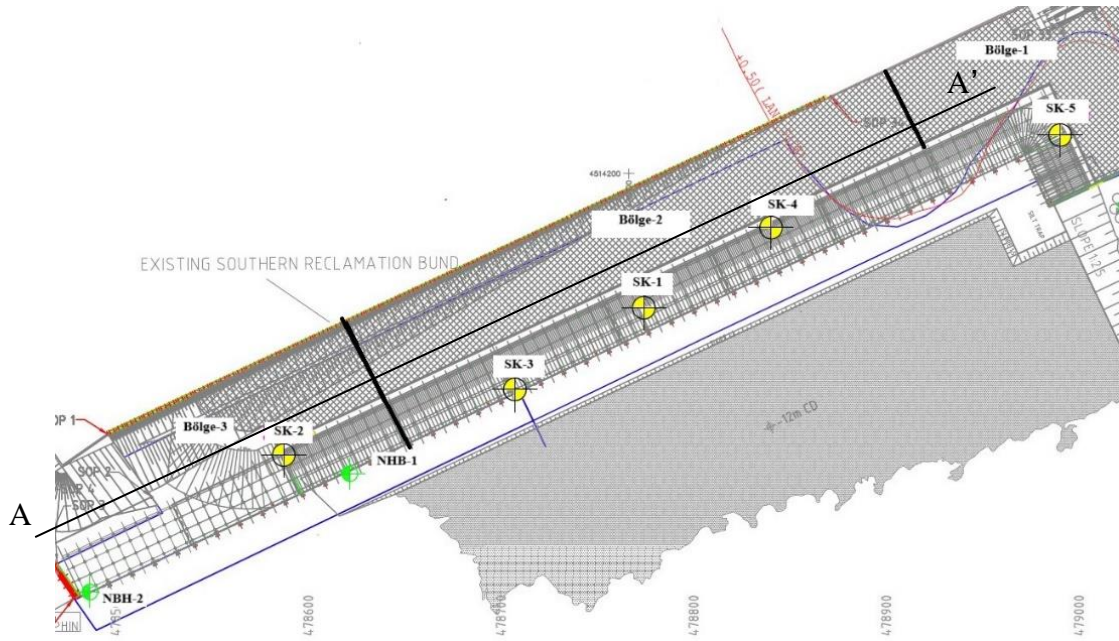
Şekil 1. İnceleme alanı bulduru haritası

Proje alanı, deniz kıyısında ve kuzeydeki yamaçlardan İzmit Körfezi'ne boşalan Sarmaşık ve Ağa Dereleri ile öteki ikincil derelerin alüvyonları ile İzmit yönünde haliç ortamında biriktiği, ancak Yarımca'ya doğru bu niteliğini yitiren kıyı alüvyonları ile güncel, sık denizel kıyı çökellerinden oluşan zemin ortamı üzerindedir. Bu alan Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı kaya birimlerinden oluşan tepelerle bunların önündeki genç Tersiyer yaşlı tortullardan ve Kuvaterner birikinti konilerinden kurulu, bir bölgede yer almaktadır (Geosan, 2017).

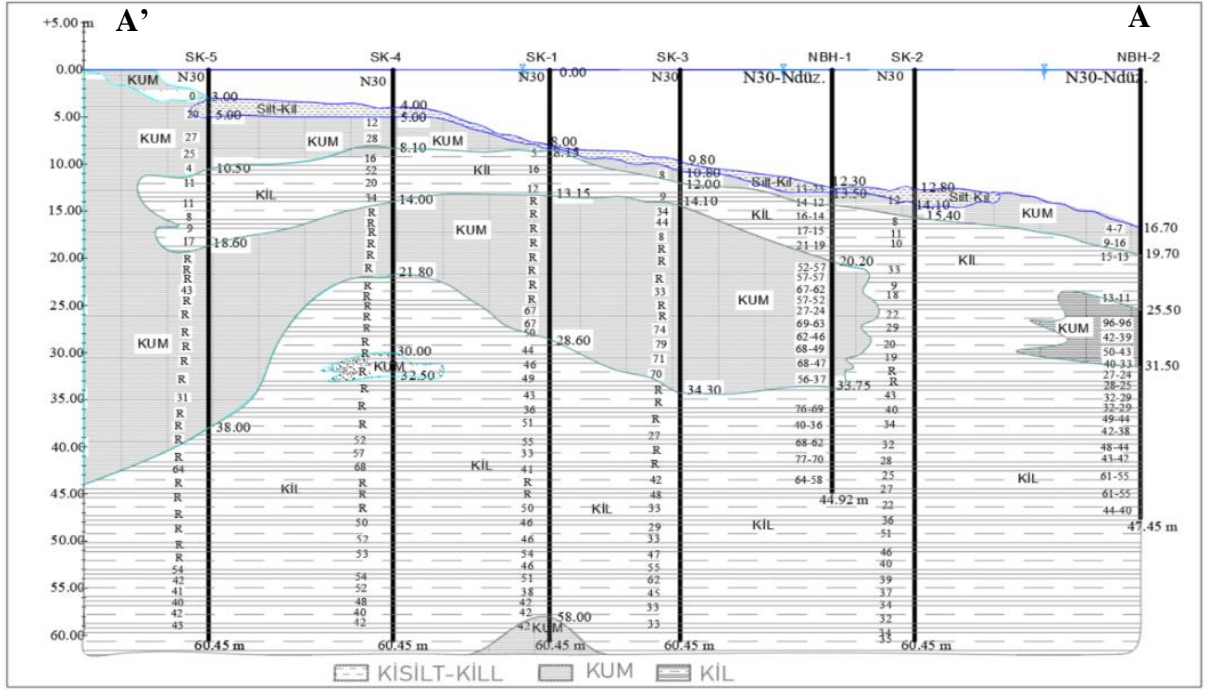
Saha zemin araştırma raporuna (Geosan, 2017) göre liman inşaat alanındaki zemin istifi ince ve iri daneli tabakalardan oluşmaktadır. Zemin araştırma sondajlarında da karşılaşılan birimler; kum, kumlu ve çakıllı sert kil ve siltli kil olarak tanımlanmaktadır. Zemin istifinin en üst düzeyini kaba çakıl ve bloklardan oluşan kıyı alüvyonuna ait tabakalar oluşturur. Derinlere doğru çoğunlukla gri, koyu gri renkli kil, siltli kil ve kum tabakalarından meydana gelen denizel ortam çökelleri izlenir. Üst seviyelerde yer alan göreceli olarak iri kırıntılı malzemeden oluşan kum, çakıllı kum, killi siltli kum ve killi karasal ortamı karakterize eden kızılımsı, sarımsı kahverengi, mor, eflatun renklidir. Bu tabakaların içinde yer yer çok sıkı, gri-kahverengi, killi çakıllı kum mercikleri yer almaktadır. Bu Kuvaterner istifin kalınlığı tam olarak bilinmemektedir. Bu istif içinde yapılan kuyuların sondaj derinlikleri Tablo 1’de verilmektedir. Liman sahasında yapılan sondajların lokasyonları Şekil 2’de ve inceleme sahanın jeolojik kesit (A-A’) Şekil 3’te verilmektedir.

Tablo 1. Sondaj bilgileri (ECAP, 2017)

Sondaj No	Deniz Taban Derinliği (m)	Kuyu Derinliği (m)
NBH-2	16,70	47,45
SK-2	12,80	60,45
NBH-1	12,30	44,92
SK-3	9,80	60,45
SK-1	8,00	60,45
SK-4	4,00	60,45
SK-5	3,00	60,45

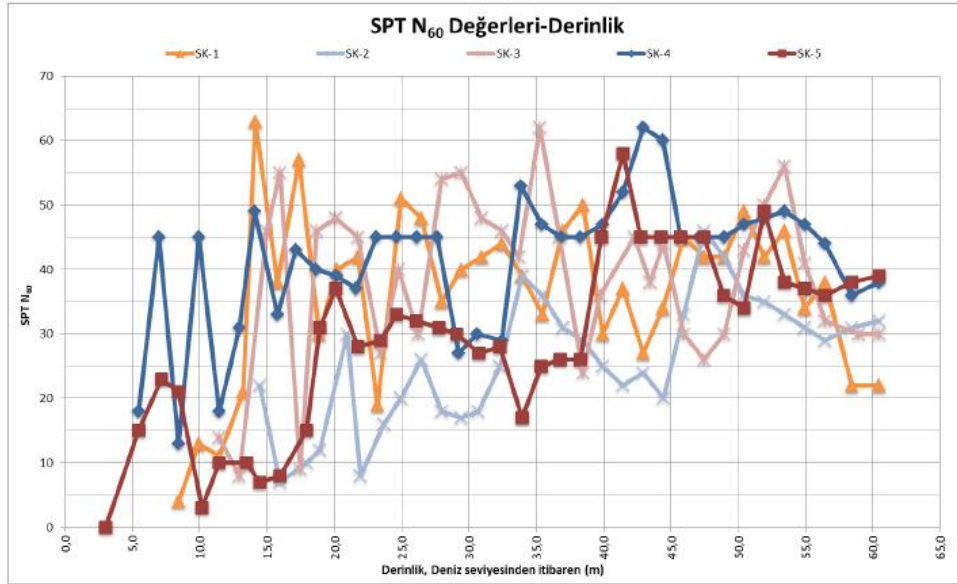


Şekil 2. Liman sahasında yapılan sondajların (Geosan, 2017) lokasyonları



Şekil 3. Yarımcı RO-RO terminal alanı zemin jeolojik kesiti (A-A') (Geosan, 2017)

Düzeltilmiş SPT- N_{60} değerleri-derinlik grafiği Şekil 4'te verilmektedir. Kazık hesaplamalarında kullanılmak üzere önerilen parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Düzeltilmiş SPT- N_{60} değerleri-derinlik grafiği (Geosan, 2017)

Tablo 2. Kazık hesabı için önerilen zemin parametreleri

	γ	c_u	ϕ	k_v	k_n	E_s	Kayma Modülü G
	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(°)	(MN/m ³)	(MN/m ³)	(MPa)	(MPa)
Orta Sıkı Kum	18,0	-	30,0	10,0	4,0	6,5	2,4
Sıkı Kum	19,0	-	36,0	17,5	10,0	12,0	4,5
Katı-Çok Katı Kil	18,0	120,0	-	10,0	8,0	60,0	22,4
Sert Kil	18,5	210,0		40,0	14,1	105,0	39,8

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada inceleme alanı olarak belirlenen Yarımca RO-RO Liman inşaat uzunluğu yaklaşık 570 metredir. 11 modülden oluşan limanda, toplamı 436 adet olan 25 mm et kalınlıklı 1219 mm ve 1016 mm çaplı ve ortalama boyu 44 m olan çelik kazıklar kullanılmıştır. Tüm kazıklar liman tasarım kriterlerine uygun penetrasyon boylarda ve yük taşıma kapasitelerinde çakılmış, Kazık Dinamik Analiz sistemi kullanılarak %100 dinamik kazık testine tabi tutulmuştur. İlk çakımdan sonra 25 adet kazıkta tekrar çakım yapılarak kazıkların nihai kapasiteleri kontrol edilmiştir.

Yarımca RO-RO Liman alanı zemin etüt ve geoteknik değerlendirme raporlarına göre farklı bölgelere ayrılmıştır. Birinci bölge S-15, S-16, M-119 ve SKD-05 sondaj kuyuları, ikinci bölge, DS-1, M-118, SKD-01, SKD-03 ve SKD-04 ve üçüncü bölge ise DS-2 ve SKD-02 sondaj kuyuları ile temsil edilmektedir (ECAP, 2017). Saha jeolojisine göre ayrılmış bölgeler Şekil 2’de görülmektedir.

Kazık tasarımı için uygun zemin tabakalarının belirlenmesi, saha zemin araştırma veri raporuna (Geosan, 2017) dayanarak yapılmıştır. Daha önce belirtilen üç bölge, farklı modüllerde bulunan kazık grupları için daha hassas çözümler elde etmek amacıyla Bölge-1, Bölge-2A, Bölge-2B, Bölge-3A ve Bölge-3B olmak üzere beş alt bölgeye ayrılmıştır (ECAP, 2017). Alt bölgeler ve tabaka derinlikleri Şekil 5’te verilmiştir.

+5.00	Modül-09A							Müdül-10	
0.00 (m)	Modül-09	Modül-8	Modül-7	Modüle-6	Modül-5	Modül-4	Modül-3	Modül-2	Modül-1
-5.00	Bölge-1	Bölge-2A	Bölge-2B			Bölge-3A		Bölge-3B	
-10.00									
-15.00	MStC-StC	StC	StC			MStC-StC		MStC-StC	
-20.00	VDS	VDS	DS			MDS		MStC-StC	
-25.00								DS	
-30.00	HaC	HaC	HaC			StC-HaC		StC-HaC	
-35.00								StC-HaC	
-40.00								StC-HaC	
-45.00								StC-HaC	
-50.00								StC-HaC	
-55.00	StC-HaC		StC-HaC			StC-HaC		StC-HaC	
-60.00	StC-HaC		StC-HaC			StC-HaC		StC-HaC	

Şekil 5. Tasarım idealize zemin profili (MDS-orta sıkı kum, StC-katı kil, DS-sıkı kum, HaC-sert kil, VDS-çok sıkı kum, MStC-orta katı kil) (ECAP, 2017)

İdeal zemin profilindeki tabakalar aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (ECAP, 2017).

Orta sıkı kum-MDS (deniz tabanında): İnce-iri taneli; köşeli-üçgen şekilli çakıllı; arkoz ve kuvars kökenli çakıllı, siyahımsı-yeşilimsi gri ve siyahımsı gri kabuk parçaları içeren kum,

Sert kil – StC: Siltli; çok kumlu, ince-orta taneli, arkoz, kuvarsit kökenli, köşeli-üçgen şekilli çakıllı; yeşilimsi kahverengi ve yeşilimsi-koyu kahverengimsi gri, kabuk parçalı ve nadiren 3-5 cm kalınlığında ince-orta taneli kum bantlı kil,

Sıkı kum – DS: İnce-kaba taneli, az/çok siltli, yer yer 3-4 cm silt bantlı, az killi, çakıllı, çakıllı; ince ila orta taneli, köşeli-üçgen şekilli, arkozik kuvars kaya kökenli taneler, yer yer 3-4 cm silt bantlı, kırmızımsı pembe, yeşilimsi/kahverengimsi gri, kabuk parçalı kum,

Sert kil – HaC: Az kumlu, çok siltli, çatlaklı, çatlak yüzeyi demir oksitli, grimsi koyu yeşil, sarımsı-grimsi yeşil, yeşilimsi gri kabuk parçalı ve kum bantlı kil.

Bölgelere göre zemin parametreleri dikkate alınarak, tüm modüller için her yapısal modülde bulunan kazıkların beklenen ve minimum penetrasyon derinlikleri ile düşey geoteknik kapasiteleri, rıhtım yapılarının yanal dayanım için gereken minimum penetrasyon derinlikleri açısından gerekli derinlik değerleri hesaplanmıştır. Bu makale kapsamında kazık hesap detaylarına girilmeyecektir. Bölgelere göre kazıkların düşey nihai geoteknik kapasiteleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Kazıkların nihai basınç ve çekme dayanımları, Eurocode-7 (EC7) Madde 7.6 prensiplerine uygun olarak hesaplanmıştır. Tasarım, Tasarım Yaklaşımı 2 (DA2) ile gerçekleştirilmiş olup, ilgili kısmi dayanım katsayıları EC7 Ek A, Tablo A.6'dan alınmıştır. Uç dayanım ve çevre sürtünme değerlerinin hesaplamaları öncelikle Tomlinson ve Woodward (2008) yöntemi esas alınarak yapılmıştır.

Tablo 3. Bölgelere göre düşey kazık geoteknik kapasiteleri (ECAP, 2017)

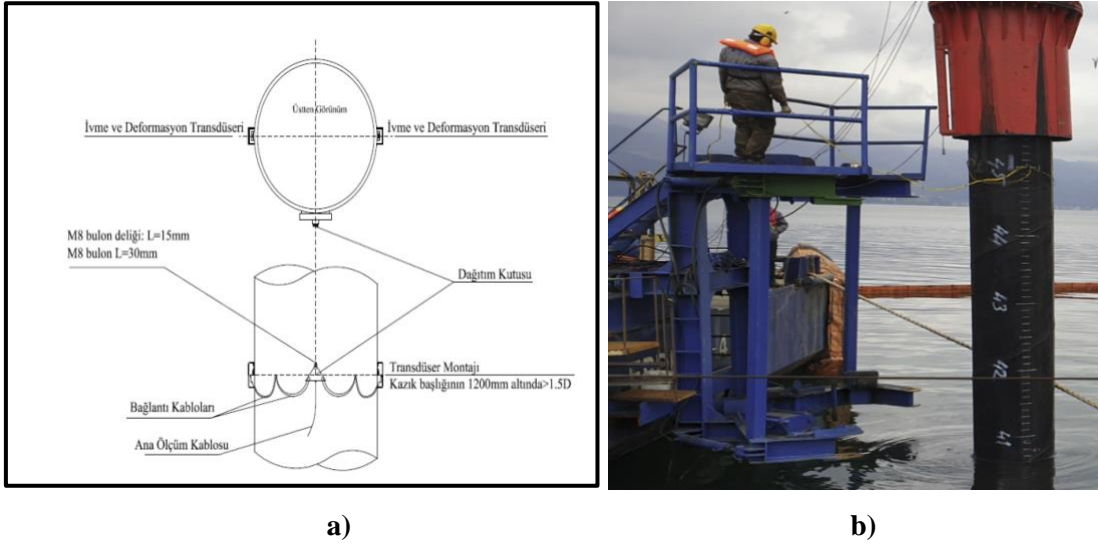
Bölgeler	Kazık Çapı (mm)	Kazık Geoteknik Düşey Taşıma Kapasitesi (kN)	Kazık Düşey Taşıma Kapasitesi (ULS) (kN)	Kazık Geoteknik Çekme Kapasitesi (kN)	Kazık Çekme Kuvveti (ULS) (kN)
Bölge 1	1016	6234	>OK	4981	4816
Bölge 2A	1016	6186	>OK	4981	4774
Bölge 2B	1016	7052	>OK	5921	5527
Bölge 3A	1016	7134	>OK	5921	5727
Bölge3B	1219	7564	>OK	4981	5892

3.1. Dinamik Yükleme Testleri

Çakılmış kazıkların taşıma kapasitesini belirleme amacıyla yapılan deneylerden biri dinamik yükleme deneyidir. Dinamik yükleme deneyi, çakılmış kazıklarda daha yaygın olarak kullanılmakta ve çakım esnasında kesintisiz veri alma imkânı sunmaktadır. İlave olarak bu testler fore kazıklara da uygulanabilmektedir ancak darbe sırasında kazıkta hasar oluşmaması için ilave tedbirler alınması gereklidir.

Dinamik yükleme deneyleri, ASTM D4945-17 (ASTM Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney ekipmanları, bir adet bilgisayar ve bunları bağlayan iki set gerilme ve ivme ölçerden oluşmaktadır. Kazığa uygulanan darbe etkisiyle sensörlerden alınan sinyaller bilgisayar sistemine aktarılmakta ve zamana bağlı ölçülen ivme ve kuvvet verileri bilgisayara kaydedilip takip edilmek üzere görsel olarak ekrana sunulmaktadır. Sensörlerin kazık üzerindeki konumu Şekil 6'de verilmektedir.

Kazığa uygulanan darbe sonucu elde edilen dalga verileri, bilgisayara bağlı sensörler aracılığıyla kaydedilir. İvme ölçerler hız dalgası, birim deformasyon ölçerler ise kuvvet dalgası verilerini sağlar. Seçilen uygun dalga verisi üzerine CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) sinyal eşleştirme yöntemi uygulanır. Kaydedilen darbe sonucunu gösteren grafikler, yazılım programında işlenir. CAPWAP modeli oluşturulurken mevcut durumu daha iyi yansıtmak için zeminle ilgili parametreler analize dahil edilir. Ölçülen ve hesaplanan değerler örtüşmezse, zemin modelinde düzeltmeler yapılabilir. Ayrıca, çarık gibi kazık imalat tercihleri de modele eklenir. Hesaplanan ve ölçülen değerler uygun şekilde örtüştüğünde, çözüm tamamlanır ve CAPWAP analizi sonucu, projeye özgü bilgiler dikkate alınarak paylaşımına hazır hale gelir. CAPWAP analizde sonuçları arasında yük-deplasman grafiği ve kazık yük taşıma kapasitesi (zeminin çakıma direnci) değerleri yer alır (Mert ve Özkan, 2017).



Şekil 6. Sensörlerin kazık üzerindeki yerleşimi a) Çizim üzerinde yerleşim (Mert ve Özkan, 2017) b) Proje sahasında uygulamaya ait bir fotoğraf

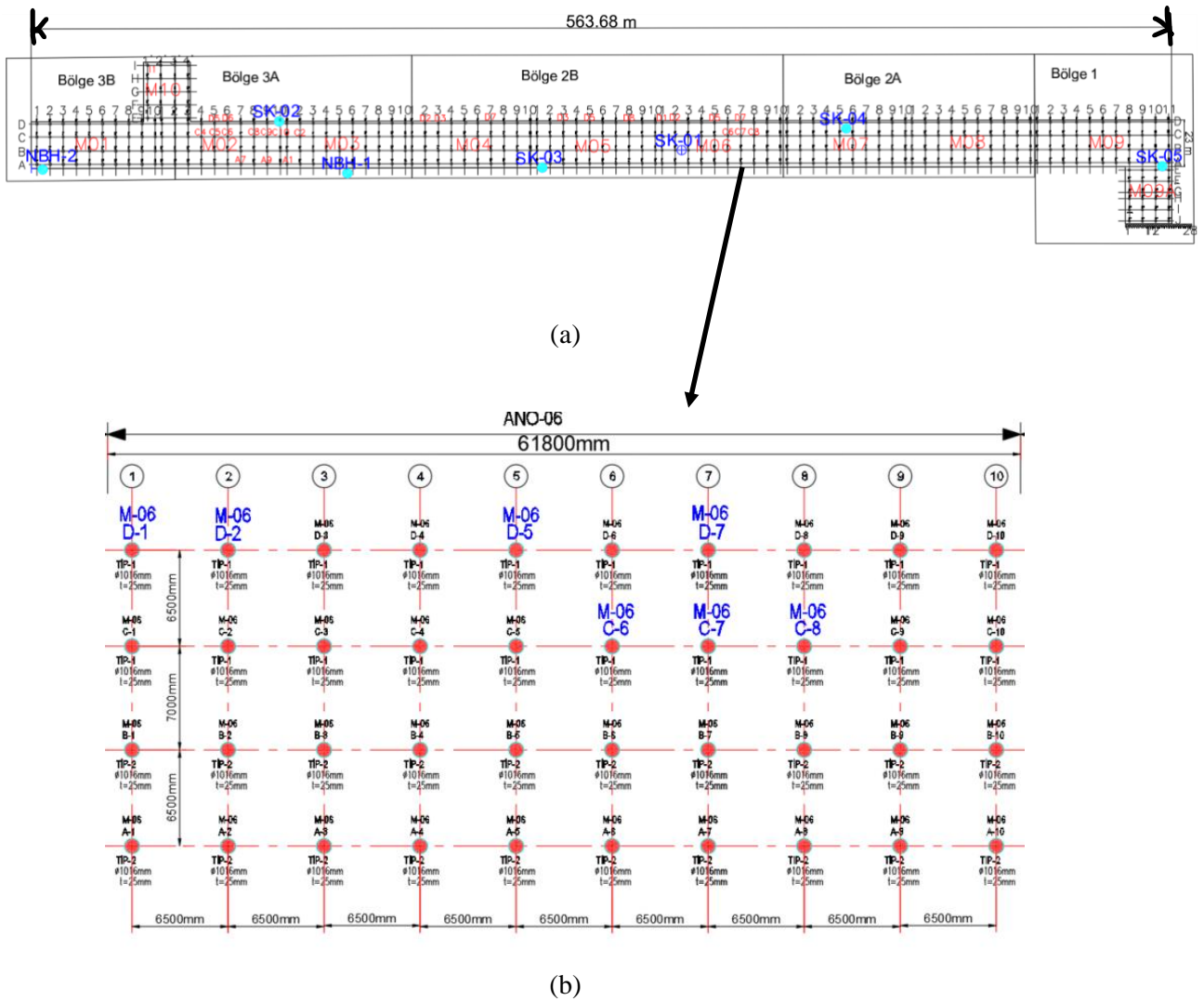
3.2. Kazık Çakım Aşamaları

Deniz taraması tamamlandıktan ve kazıklı temel tasarımları deneme kazıklarıyla doğrulandıktan sonra, proje kazık yapım çalışmalarına başlanır. Kazık çakım dubası, römorkör tarafından çapaların noktaları ağıнын merkezi konumuna çekilir. Çapa hatları, kazık çakma pozisyonunu almak için ölçüm ekibinin talimatlarına göre kontrol edilir. İmalatı tamamlanan kazıkların her iki tarafına kapaklar yerleştirilir ve yüzdürülerek kazık çakım noktasına çekilir. Ölçüm ekibi kontrolü eşliğinde çakım noktasına sabitlenmiş kazık çakım dubası üzerindeki vinç yardımıyla kazık çakım kulesine yerleştirilir. Gerekirse kazık titreşimli çekiç ile zemine sabitlenir ve ardından darbeli çekiç ile çakıma devam edilir. Dinamik test teknik şartnamesinde belirtilen kriterlere uygun olarak darbeli çekiç çakımının bir aşamasında çakım durdurularak dinamik test enstrümanları kazık üzerine monte edilir. Dinamik test eşliğinde çakıma devam edilir. Çakım sonlandırılırken kazık penetrasyon boyu, refü kriteri ve dinamik test verilerinden faydalanılır. Kazık üzerinde duran çekiç duba üzerine yerleştirildikten sonra bir sonraki çakım noktasına geçilir.

3.3. Kazık Çakım Sonu (EOD) ve Tekrar Çakım (BOR) Dinamik Kazık Testleri

Proje kazıkları için refü kriterinin saptanması amacıyla yapılan çalışmalarda alternatif çekiçler de dikkate alınmıştır. Farklı çekiç teknik özellikleri kullanılarak çakılabilirlik analizleri ve Kummel metodu analizleri yapılmış, çakılan kazıklarda yapılacak testlerde hedeflenen düşey kazık kapasitelerinin kabul edilebilir refü kriterleri ile eşleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çakılabilirlik analizi yapılırken bilgisayar yazılımları kullanılabilir. Bu program vesilesi ile toplanan tüm veriler değerlendirilip çakım ekibine yardımcı olacak dokümanlar hazırlanabilmektedir. Bunlar çakımın

yapılacağı devire denk gelen dakikadaki darbe sayılarında (tipik olarak 39-35) ayrı ayrı çalışılabilmektedir. Bu dokümanlar ile belli bir çakım boyu için (örnek:10 cm) vurulan darbe sayısının kazık kapasitesi ile ilişkilmesi grafikler yoluyla sağlanabilmektedir. Tekrar çakım yapılan kazıkların listesi Tablo 4’te verilmektedir. Kazıkların yeterli eksenel düşey taşıma kapasitesi yanı sıra tasarımda hesaplanan minimum penetrasyon uzunluğunu da sağlanması beklenir. PDA (Pile Dynamic Analysis) test sonuçları, hesaplanan nihai kazık taşıma kapasiteleri ($5921 \text{ kN}/9.80665 \cdot 1.1=664.15 \text{ ton}$) %10 artırılmış değerleri temel olarak değerlendirilmiştir. Mümkün olduğunca tekrar çakım kazıkları bölgelere dağıtılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, tekrar çakım kazık seçiminde ilk kazık çakım dinamik test veri sonuçları dikkate alınmaktadır. 6 nolu modüldeki tekrar çakımı yapılan kazıklar Şekil 7’de plan görünüm üzerinde mavi ile işaretlenmiştir.



Şekil 7. Jeolojik bölgeler planı (a) Genel bölgeler planı (b) Tekrar çakım yapılan kazıkların lokasyonları

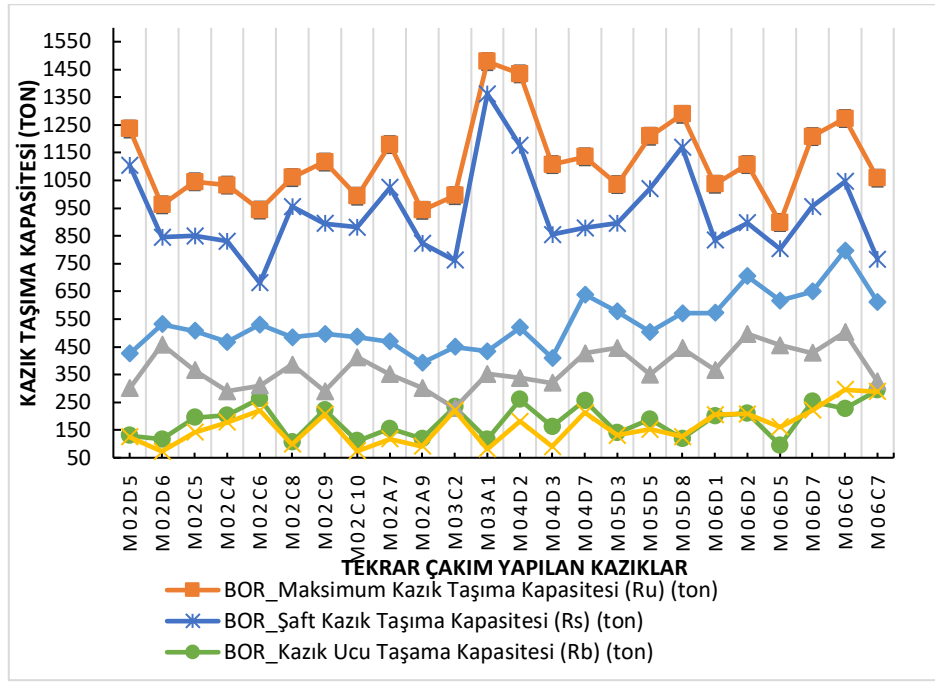
İlk çakımlar ve bir süre sonra yapılan tekrar çakımlarında tespit edilen kazık kapasiteleri Tablo 4’tedir. Ayrıca, tabloda zamana bağlı olarak kazık çevre sürtünme direnci, uç kapasitelerindeki

değişim ve çevre sürtünme direnci karşılaştırılmasıyla bulunan kazık taşıma kapasite artış oranları da gösterilmektedir.

Tablo 4. Tekrar çakım yapılan kazıkların listesi ve dinamik yükleme test sonuçları

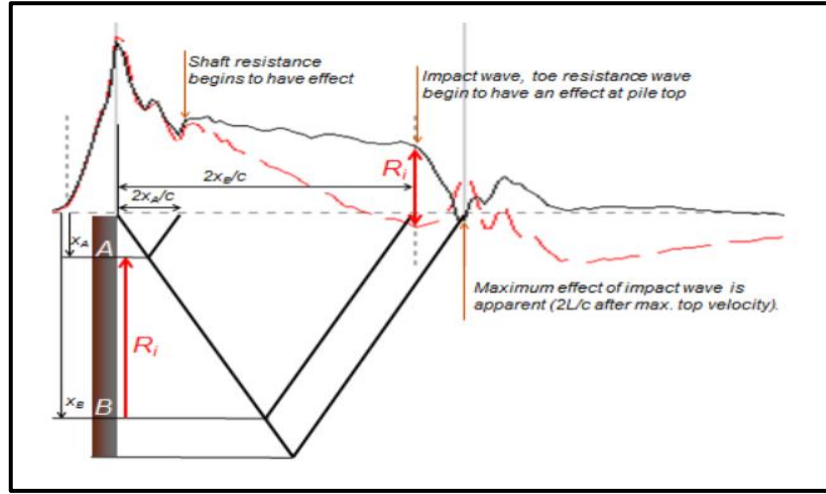
Madde Numarası	Aks ve Kazık No.	Penetrasyon Derinliği (m)	Kazık Uç Kotu (m)	Toplam Kazık Uzunluğu (m)	Dinamik Yükleme Test Sonuçları								Geç Zaman (Gün)	BOR/EOD
					Dinamik Yükleme Testi (İlk Çakım Sonu (EOD))				Dinamik Yükleme Testi (BOR)					
					İlk Çakım Tarihi	Toplam Kapasite (ton)	Çevre Sürtünme Kapasitesi (ton)	Kazık Uç Taşama Kapasitesi (ton)	Tekrar Çakım Tarihi	Toplam Kapasite (ton)	Çevre Sürtünme Kapasitesi (ton)	Kazık Uç Taşama Kapasitesi (ton)		
1	M02D5	31.72	-45.29	46.39	22-01-20	425	300	125	02-02-20	1235	1105	130	12	2.91
2	M02D6	32.05	-45.25	46.35	23-01-20	531	458	73	13-02-20	962	845	117	22	1.81
3	M02C5	31.27	-45.07	46.17	24-01-20	507	365	142	01-02-20	1045	850	195	9	2.06
4	M02C4	31.47	-44.87	45.97	24-01-20	468	290	178	01-02-20	1033	830	203	9	2.21
5	M02C6	30.60	-43.95	45.05	23-01-20	530	310	220	03-02-20	943	680	263	12	1.78
6	M02C8	32.37	-45.81	46.90	01-07-20	484	386	98	02-07-20	1060	955	106	2	2.19
7	M02C9	32.50	-45.82	46.92	01-07-20	496	289	207	02-07-20	1116	894	222	2	2.25
8	M02C10	32.90	-45.85	46.95	01-07-20	486	412	74	02-07-20	993	881	111	2	2.04
9	M02A7	32.13	-45.83	46.93	04-07-20	469	351	118	06-07-20	1179	1024	155	3	2.51
10	M02A9	31.91	-45.89	46.99	04-07-20	392	301	91	06-07-20	942	823	119	3	2.40
11	M03C2	33.00	-45.85	46.95	02-07-20	449	229	221	03-07-20	995	762	233	2	2.22
12	M03A1	32.75	-45.83	46.93	04-07-20	434	352	82	06-07-20	1478	1362	116	3	3.41
13	M04D2	31.37	-44.24	45.34	25-02-20	519	338	181	20-03-20	1434	1175	259	25	2.76
14	M04D3	31.37	-44.23	45.30	23-02-20	410	320	90	20-03-20	1107	855	162	27	2.70
15	M04D7	31.47	-44.23	45.33	22-02-20	638	426	212	20-03-20	1135	879	256	28	1.78
16	M05D3	31.56	-44.21	45.31	20-02-20	577	446	131	20-03-20	1035	895	139	30	1.79
17	M05D5	31.68	-44.23	45.33	19-02-20	503	350	152	20-03-20	1209	1020	188	31	2.40
18	M05D8	32.27	-44.22	45.32	17-02-20	571	445	126	20-03-20	1288	1169	119	33	2.26
19	M06D1	32.57	-44.24	45.34	15-02-20	572	367	205	10-03-20	1036	835	201	25	1.81
20	M06D2	32.59	-44.16	45.20	15-02-20	704	496	208	17-03-20	1107	897	210	32	1.57
21	M06D5	29.86	-41.51	42.61	31-01-20	617	456	161	10-03-20	898	803	95	40	1.46
22	M06D7	34.44	-45.70	46.80	26-01-20	649	428	221	17-03-20	1208	956	252	52	1.86
23	M06C6	27.85	-40.80	41.90	28-01-20	797	502	295	29-02-20	1273	1046	227	33	1.60
24	M06C7	27.74	-40.64	41.74	27-01-20	612	324	288	08-03-20	1058	765	293	42	1.73

Şekil 8’de tekrar çakım yapılan kazıkların çevre sürtünme ve uç dirençlerinin değişim grafiği verilmektedir. Grafikte uç dirençlerindeki artış oranı ile çevre sürtünme direnç artış oranları arasındaki fark açıkça görülmektedir. Geniş aralıklı direnç artışı çevre sürtünme direncinde meydana gelmektedir.



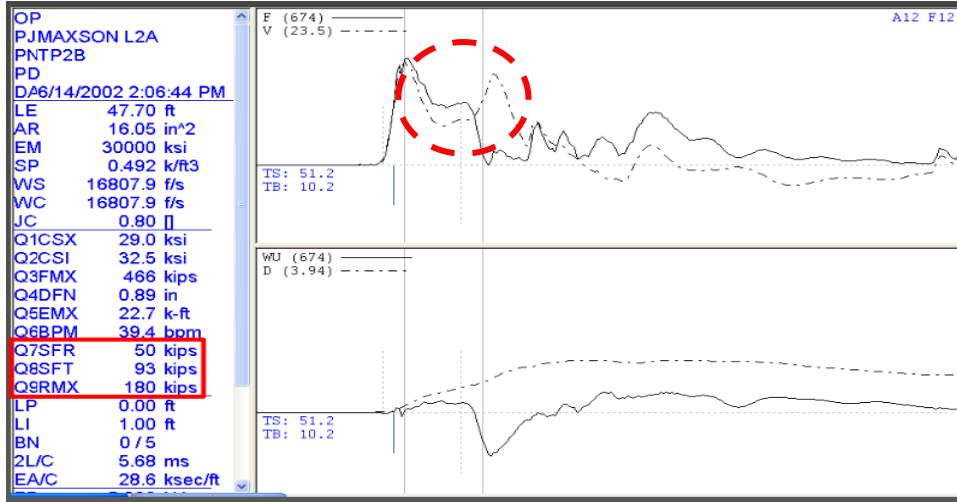
Şekil 8. Tekrar çakım sonuçlarına göre kazıkların toplam, çevre sürtünme ve uç direnç değişimi (EOD: Kazık çakım sonu, BOR: Tekrar kazık çakımı)

Grafik olarak gerilme dalgasının kuvvet ve hız grafiklerindeki gösterimleri (PDA, 2012) Şekil 9'da gösterilmektedir. Kazığın zemine girdiği noktadan itibaren F ve V sinyalleri ayrışmaya başlar ve Case yönteminde bu iki sinyal arasındaki alanın ölçülmesi ile kazık kapasitesi hesaplanır. Belirgin bir uç direnci sahibi olan kazıklarda darbenin oluşturduğu dalganın uçtan geri yansımaları da gözlemlenebilecektir. Case yöntemi ile yapılan hesaplama zeminin çakıma olan dinamik direnci ve statik kapasitesini bir toplam olarak gösterir ancak Dinamik test sırasında alınan ölçümlerin yazılımlar vesilesiyle uygun zemin parametreleri ile modellenmesi sayesinde bu kapasiteler ayrı olarak değerlendirilebilir. Özellikle kazığın (restrike) yeniden çakım testinde vurulan toplam 10 darbenin en baştakilerinden alınan ölçümler değerlendirilerek bu statik direncin tespiti ve gerçekleştiği takdirde zamana bağlı artışı kayıt altına alınabilmektedir.



Şekil 9. Kazık üzerinde darbe etkisiyle oluşan stres dalgasının hareketinin Kuvvet (F) ve Hız (V) grafikleri ile gösterimi.

Tipik olarak kazık çakımı sonunda yapılan EOD test ile aynı kazığa bir süre sonra yapılan BOR test grafikleri arasında aşağıdaki gibi bir değişim görülmesi beklenir (Rausche, 2015). Çakım sonundaki Pile Driving Analyzer (PDA) cihaz ekranında takip edilen parametreler Şekil 10'da verilmektedir.



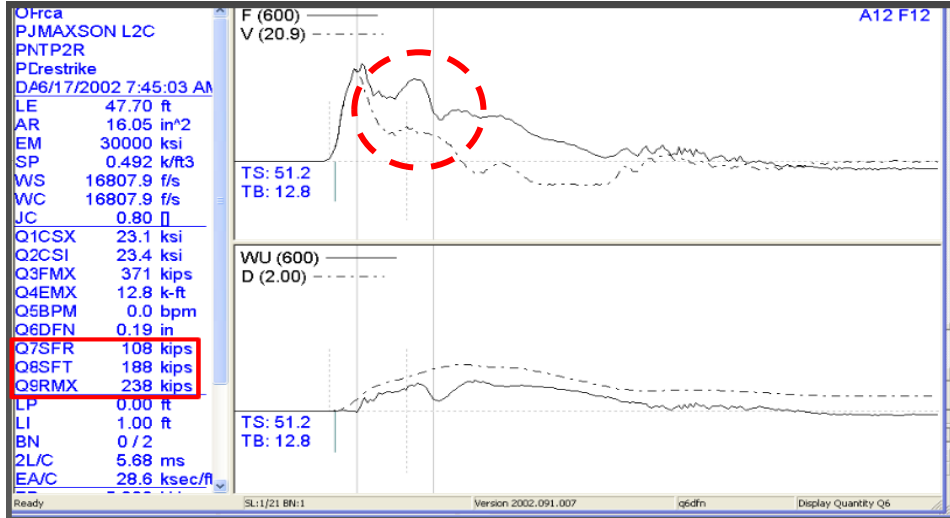
Şekil 10. EOD (End of Drive) PDA cihaz ekran görüntüsü

Burada görülen parametreler zemin etütleri neticesinde ve daha önceki kazık çakım tecrübelerine binaen ekranda takip edilmesi düşünülmüş seçilmiştir. Hepsinde yer alan "Q" ön eki miktarı (quantity) manasına gelmektedir. CSX ve CSI maksimum basınç gerilmesi ve ilk basınç gerilmesini gösterir.

Kazığa gelen darbenin azami değeri kuvvet birimi cinsinden FMX (Maximum Force) ile takip edilebilirken EMX (Maximum Transferred Energy) ise başlık sisteminin sönümlenmesinden sonra kazığa aktarılan çakım enerjisini kayıt altına almaktadır. Kırmızı ile işaretlenmiş parametreler ise

sönümlenme katsayılarına (case damping coefficients) göre oluşan sürtünme dayanımlarını ve bileşke dayanımı göstermektedir. Sahada alınan verilerin sonradan işlenerek modele uygun hale getirilmesi gerektiğinden burada gözükten kazık kapasitelerinin nihai değerler olmadığı unutulmamalıdır.

Şekil 10 ve Şekil 11 incelendiğinde iki sinyal arasındaki alanın arttığı gözlemlenebilecektir. Özellikle kazığın ucuna kadar olan kısımda yer alan artış sürtünme direncinin arttığına bir işareti olarak kabul edilebilir. Tekrar çakım testlerinde kazığın kapasitesini mobilize edebilecek büyüklükte bir enerji sağlanması gerekmektedir. Toplamda 10 darbe civarında kayıt yapıldıktan sonra testin sonlandırılması beklenir. Bu sırada ilk darbelerden yüksek temsilîyet kabiliyetine sahip bir tanesi seçilerek modellenmesi durumunda kazığın zaman içinde sahip olacağı dayanıma daha yakın bir tahmin yapmak mümkün olacaktır. Bu darbenin seçimi yapılırken testin başlangıcına yakın olması ve kazığa aktarılan çakım enerjisinin düzgün biçimde kayıt altına alınmış olabilmesi şartıyla, emsal proje kazıkları, çakım raporları ve saha etüt raporları incelenerek karar verilir.



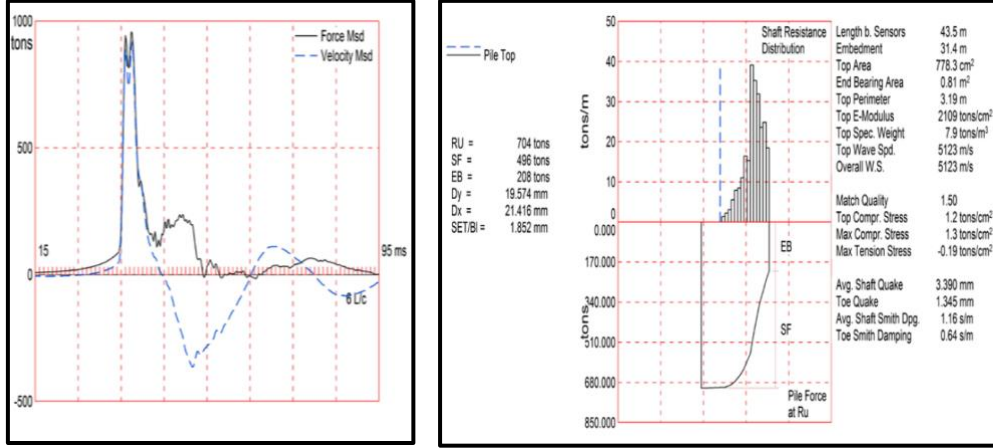
Şekil 11. BOR PDA cihaz ekran görüntüsü

Tablo 4’de toplu halde sonuçları gösterilen 24 adet proje kazığı arasından seçilmiş bazı kazıkların da benzeri şekilde bir incelemesi yapılarak bu kazıkların yeterli kapasiteye sahip olup olmadığı sorgulanmıştır. Bu değerlendirme sırasında statik yükleme testi ve diğer kazık çakımlarının çakım sonundaki darbe sayıları, kazık uç kotu ve CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) model kapasitesi sonuçlarından da istifade edilmiştir.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada yapılan analizler sonucu elde edilen bulgular bu kısımda değerlendirilmiştir. Tablo 4’teki M06D02 kazığının 1 Şubat 2020 tarihinde yapılan çakımı neticesinde EOD kapasitesi

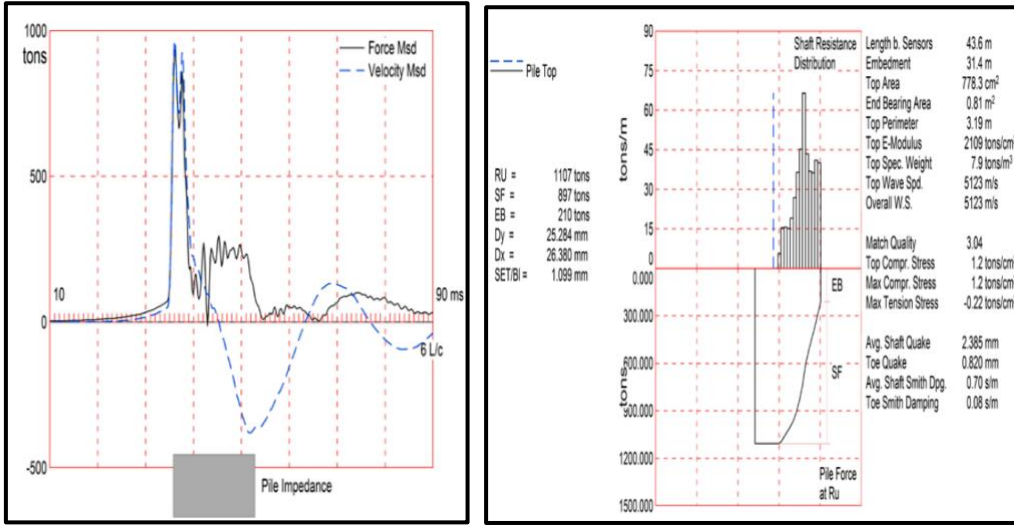
704 ton olarak modellenmiştir. Şekil 12’de toplam nihai statik kapasiteyi gösteren RU değeri sürtünme direnci 496 ton ile uç dayanımı olan 208 tonun da toplamına eşittir.



Şekil 12. M06D02 kazığının EOD CAPWAP Modeli sonuçları

Yukarıdaki modelde kazığın kapasitesinin çoğu sürtünme direncinden (496 ton) geldiği tespit edilmiştir. Sürtünme direncinin kazık üzerindeki dağılımı sağdaki grafikten görülebilir. Buna ilave olarak sürtünme direncinde derinliğe bağlı değişimin zemindeki heterojen yapıya da işaret ettiği gözlemlenebilir. Dinamik testler zemin etütlerinin yerine geçebilecek bir veri üretmese de kazık taşıma kapasitesi dağılımı cinsinden bazı veriler sunarak zemin bilgisine katkıda bulunabilir. Burada bu dağılımın doğruluğu sinyal eşleme başarısı ile takip edilmiştir. Endüstri standardı olan 4 değerinden daha iyi bir model üretilmiş ve $MQ = 1.5$ elde edilmiştir.

Şekil 13’te kazığın tekrar çakım ölçümleri 18 Mart 2020’de alındıktan sonra yapılan CAPWAP modeli görülebilir. Bu modelde uç direnci aşağı yukarı aynı kalırken beklendiği üzere sürtünme direncinde yükselme meydana gelmiştir. İki kazığın grafikleri incelendiğinde, yatay ekseninde ölçülen zaman değeri kazık boyu için aynı olsa da alınan kayıt başlangıcı 10 ms (milisaniye) yerine 15 ms’den başlatıldığı için 90 ms yerine 95 ms’de bitmiştir. BOR (tekrar kazık çakımı) kaydındaki darbenin başlangıç noktası F ve V grafiklerinin tepe noktasını dikkate alarak eşitlenirse BOR kaydındaki sürtünme direncine işaret eden alanın daha büyük olduğu görülebilir. Model neticesinde kazık kapasitesi 1107 ton olarak tespit edilmiş, bunun 897 ton da sürtünme direncinden gelmiştir.



Şekil 13. M06D02 kazığının BOR CAPWAP Modeli

Bu çalışmada incelenen M2C6 ve M2D6 yan yana çakılan özdeş iki kazıktır. M2C6 kazığının ilk çakımdaki çevre sürtünme taşıma kapasitesi 310 ton, uç kapasitesi 220 ton iken yaklaşık 10 gün sonra yapılan tekrar çakımlarda çevre sürtünme direnci 680 ton ve uç kapasitesi 263 tona yükselmiştir. Uzun dönem taşıma kapasitesinin çakım sonrası kapasitesine oranı 1.78 olarak hesaplanmıştır. M2D6 da EOD çevre sürtünme direnci 458 ton, uç kapasitesi 73 ton iken yaklaşık 20 gün sonra gerçekleştirilen tekrar çakımda BOR çevre sürtünme direnç kapasitesi 845 tona ve uç kapasitesi 117 tona yükselmiştir. Bu kazıkta kapasite artış oranı 1.81 bulunmuştur. Bu iki kazıktaki nihai kazık kapasite artış oranları birbirine yakın değerlerde görünüyor iken bu iki kazığa yakın, aynı jeolojik özellikteki ortamda olduğu kabul edilebilecek M02D5 nolu kazıkta kapasite artış oranı 2.91 olarak, M03A1 nolu kazıkta bu oranın 3.41 katına kadar yükseldiği tespit edilmiştir (bakınız Tablo 4).

Modül 6'daki kazıkların tekrar çakım ile ilk çakım kapasiteleri arasındaki oranlar ve diğer tekrar çakım yapılan kazıkların kapasite artış oranları arasında önemli farklılıklar gözlemlenmektedir. Modül 6'daki kazıkların kapasite artış oranları, tekrar çakım aralıkları nispeten daha uzun olmasına rağmen daha düşük kalmıştır. Bu farklılığın nedenleri jeolojik ortam ve penetrasyon derinlikleri olarak açıklanabilir. Modül 6'daki jeolojik ortam, KS-1 sondaj verileri ile değerlendirilebilir. SK-1 ile SK-3 karşılaştırıldığında, SK-1'deki kum ara tabakası daha ince olup, bu tabakanın alt seviyelerinde SPT değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 4 tekrar çakım sonuçları incelendiğinde geçen süre ile direnç artış oranlarının paralellik göstermediği görülmektedir. Tekrar çakımın ilk çakımdan en az 20 gün sonra yapılması tavsiye edilmektedir (Sawant ve ark., 2013). Tablo 4 bu çerçevede incelendiğinde ilk çakımdan ortalama 37 gün sonra çakılan Modül 6 tekrar çakım kazık direnç artışlarının, ortalama 7 gün sonra tekrar çakım yapılan Modül 2 kazıklarından yüksek olmadığı görülmektedir. M02D6 ve M02C6 kazıklarının tekrar

kazık çakımları aynı modül içindeki 2 ve 3 gün sonra tekrar çakım yapılan kazıklardan daha düşük olduğu görülmektedir. Bu, jeolojik ortamdaki sondajlarla net bir şekilde ortaya konamayan zemin sınıfı değişkenliği, tabaka kalınlığı ve ceplerden kaynaklanabilir.

Modül 3, Modül 4 ve Modül 5 tekrar çakım kazıklarının direnç artışları birbiriyle karşılaştırıldığında birkaç kazık dışında her bir modül bazında direnç artış oranlarında paralellik olduğunu söylemek yanlış olmaz. Bu durum bu vaka için tekrar çakım kazıklarında Şekil 5’de verilen zemin jeolojik farklılıklarının ilk çakımdan sonra geçen zaman faktöründen daha etkin olabileceğini göstermektedir. 6 nolu Modül de tekrar çakımları 25-52 gün içinde gerçekleştirilirken direnç artış oranları 1.46 ile 1.81 arasında değişmektedir. Geçen süre ve direnç artış oranı arasında tam bir paralellik görülmemektedir. Kapasite artış oranlarının dağılımında zemin karakteristiği öne çıktığı söylenebilir. SK-3’ün her iki yanındaki M04D7 ve M05D3 kazıklarının kapasite artış oranları 1.78 ve 1.79 olarak paralellik göstermektedir. M6 içindeki tekrar çakım kazıklarının kapasite artış oranlarının çoğunluğu paralellik göstermektedir. Bu durum SK-1 noktasındaki zemin karakteristiğine bağlanabilir.

Saha ve laboratuvar sonuçlarına bağlı olarak kohezyonlu zeminlerde zamana bağlı sürtünme kapasitesi artışının tayini için çalışmalar mevcuttur (Komurka ve ark., 2003) ancak bu makalenin verilerini temel aldığı projede bunlara ilave yapacak kadar uzun süreli ve kısa süreli denemeler yapmak mümkün olmamıştır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Yarımcı Ro-Ro Limanı inşaatında, proje teknik şartnamesi ve ilgili standartlara uygun olarak 436 adet kazık çakılmıştır. Kazık çakımlarında %100 dinamik test kullanılarak, çakım ile kazık taşıma kapasiteleri tespit edilmiştir. Bu kazıklardan 24’ünde, ilk çakımdan belirli günler sonra tekrar çakım yapılmış ve zamanla kazık taşıma kapasitesindeki değişim incelenmiştir. Tekrar çakım yapılan tüm kazıklarda kapasite artışları tespit edilmiştir. Kazık kapasite artış oranları 1.46 ile 3.41 kat arasında değişkenlik göstermektedir. Yapılan değerlendirmelerde, toplam kapasite artışlarında çevre sürtünme direncinin, uç direncine kıyasla daha yüksek olduğu saptanmıştır. Kapasite artış oranları ile tekrar çakım zaman aralıkları arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır. Konsolidasyonun bu kapasite artışlarına katkısını net bir şekilde ortaya koymak için, zemin türüne bağlı olarak çok daha uzun zaman aralıklarında kapasite değişimlerinin gözlemlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Tespit edilen kazık taşıma kapasitesi artış oranları oldukça yüksektir. Kazıkların zaman içindeki artan/azalan kapasite değişimi, geoteknik alanında araştırma yapan araştırmacıların yeni ilgi alanlarından biridir. Literatür taramalarında, çalışmaların daha çok kapasite artışlarıyla ilgili olduğu görülmektedir. Özellikle, kazık çakımı yapılan zeminin özellikleri ve ilk çakımdan sonra geçen

zamana bağlı olarak kapasite artışının formüle edilmesine yönelik araştırmalar bulunmaktadır. Ancak, henüz üzerinde ortak görüş birliğiyle oluşturulmuş, standardize edilmiş bir formüle ulaşılamamıştır. Tespit edilen kapasite artışlarının belli oranda kullanılması düşünölen projelerde, tekrar eden deneylerle desteklenmemiş ve standardize edilmemiş yaklaşımlar olması nedeniyle kazıkla temel yapıda istenmeyen deformasyonların ortaya çıkmasına sebep olabileceği hesaba katılmalıdır.

Kazık taşıma kapasitesi artışını (pile/soil set-up) tespit etmek için, kazık en az iki kez, çoğunlukla dinamik test yöntemi kullanılarak ölçölmektedir. Direnç artışı için ölçüm zamanlaması en önemli ölçütür. İlk deney çakımın hemen sonunda, ikincisi ise proje koşullarına göre mümkün olduğunca uzun bir süre sonra gerçekleştirilmelidir.

Boşluk suyu basınç azalması, kazığın kısa dönemli direnç artışını açıklayabilir; fakat uzun dönemde kaydedilen direnç artışları, efektif gerilme artışlarından bağımsız, muhtemel diğer nedenlere bağlı olabilir. Aşırı boşluk suyu basıncının dağılması, kazık çapının karesi ile doğru orantılı, zemin yanal konsolidasyon katsayısı ile ters orantılıdır. Bu sebeple, büyük çaplı kazıkların direnç artışları, küçük çaplı kazıklardan daha uzun sürer. Aynı durum dikkate alındığında, kazık grubunun direnç artışı, tek bir kazığın direnç artışına göre daha uzundur. Kazık kapasite artış oranının tespitine yönelik, zemin araştırma çalışmalarını kapsamında veya kesin kazık tasarımı öncesinde, kazık ön yükleme deneyleri gibi saha deneylerinin geliştirilmesine yönelik akademik araştırmalar yapılmaktadır. Kesin tasarım öncesinde bu tür yöntemlerin geliştirilmesi ve bu yolla kapasite artışlarının formüle edilmesi, daha ekonomik projelerin gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, vaka analizi ve veri paylaşımı ile bu alanda yapılmakta olan çalışmalara katkı sağlandığı düşünölmektedir. Kazık kapasitesinin hızlı ve çakıma paralel ölçölebildiği dinamik test yönteminin kullanıldığı projelerde, daha fazla kazıkta tekrar çakım yapılması; zemin özellikleri, tekrar çakım zaman aralığı, kazık boyu ve kazık uzunluğu gibi önemli faktörlerin sahada kontrollü tespiti, bu alandaki çalışmalara katkı sağlamak amacıyla önerilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar Yarımca RO-RO Terminaline ait verilerin kullanılmasına izin verilmesinden dolayı Sayın Murat Çaęatay'a ve kendisinin nazarında Yatırımcı firmalara teşekkür ederler.

Yazarların Katkısı

İnce: Veri toplama, taslağın oluşturulması, revizyon

Karakaş: Taslağın oluşturulması, revizyon

Coruk: Verilerin analizi ve yorumlanması, revizyon

Yüksel: Dinamik test modellerinin açıklanması ve yorumlanması

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur

Kaynaklar

- Ateş B, Şadoğlu E (2022a) Experimental and Numerical Investigation of Load Sharing Ratio for Piled Raft Foundation in Granular Soils. *KSCE J Civ Eng*, 26, 1662–1673, <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1022-4>.”
- Ateş, B., Şadoğlu, E. (2023) Experimental Investigation for Group Efficiency of Driven Piles Embedded in Cohesionless Soil. *KSCE J Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1580-0>.”
- Ateş B, Şadoglu E (2022b) Experimental and Numerical Investigation for Vertical Stress Increments of Model Piled Raft Foundation in Sandy Soil. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 46, 309–326, <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00618-7>.
- Ateş B, Şadoğlu E (2021a) Experimental Investigation of Optimum Piles Spacing for Piled Raft Foundation in Sandy Soils. *Technical Journal*, 32 (1), 10477-10494, DOI: 10.18400/tekderg.644885 (Lines 16-21 of page 3).
- Ateş, B., Şadoğlu, E. (2021b) Experimental and Numerical Investigation of Single Pile Subjected to Vertical Load in Sand. 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt, Turkey.
- Ateş, B., Şadoğlu, E. (2021c) Experimental Investigation of Pile Addition and Length on Bearing Capacity and Settlement of Rafts on Loose Sandy Soil, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*. 2, 025601 (399-407) DOI: 10.35414/akufemubid.863095.
- Ahlinhan M. F., Adjovi E. C. (2020) Setup of axial bearing capacity of open-ended tubular steel piles driven in sand, *Studia Geotechnica et Mechanica*; 42(1); 74–82.
- API WSD RP-2A Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, American Petroleum Institute, 2000 (with later errata and supplements).
- Basu, P., Salgado, R., Prezzi, M. and Chakraborty, T. (2009). A method for accounting for pile set up and relaxation in pile design and quality assurance. Joint Transportation Research Program, SPR-2930.
- Ciavaglia, F., Carey, J., Diambra, A. (2017). Time-dependent uplift capacity of driven piles in low to medium density chalk. *Géotechnique Letters*, 7(1), pp. 90–96.
- Chimdesa, F.F., Chimdesa, F.F., Jilo, N.Z. et al. Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. *Sci Rep* 13, 15875 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42783-x>
- ECAP, (2017). Foundation design for deck on piles berth. Yarımca Ro-Ro Terminal Development Project. (Yayınlanmamış rapor).
- Eurocode 7 (2004). Geotechnical Design-Part 1: General rules, BS-EN 1997-1:2004, BSI.
- Geosan, (2017). Soil investigation interpretative report. Yarımca RO-RO Terminal Development Project. (Yayınlanmamış rapor).
- Komurka, V. E., Wagner, A. B., and Edil, T. B. (2003). Estimating soil/pile set-up. Final Report Submitted to the Wisconsin Department of Transportation. Wisconsin Highway Research Program #0092-00-14, 55 pp.

- Lee, M. L., Ming, J.W.S., Kok Sien Ti, K. S., Leong, L.T., Wai1, Y.T. (2019) Empirical equations for predicting pile/soil setup effect. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 527 (2019) 012014 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/527/1/012014.
- Lua Hoang Thi, Xi Xiong, Tatsunori Matsumoto (2024) Effect of pile arrangement on long-term settlement and load distribution in piled raft foundation models supported by jacked-in piles in saturated clay. SOILS AND FOUNDATIONS 64(2):101426. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101426>.
- Mert, M. ve Özkan, M.T. (2017) Statik ve dinamik kazık yükleme deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu 22-23-24 Kasım 2017, İstanbul
- Pile Dynamics, Inc. (PDA) (2012). Manual of the pile driving analyzer (Appendix A case method wave mechanics, theory and derivations, examples, and practice problems. 30725 Aurora Road Cleveland, OH 44139 USA www.pile.com
- Pestana, J. M., Hunt, C. E. and Bray, J. D. (2002). Soil deformation and excess pore pressure field around a closed-ended pile. J. Geotechn. Geoenviron. Eng., 128, (1), 1–12.
- Randolph, M. F., Carter, J. P. and Wroth, C. P. (1979). Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation. Geotechnique, 29, (4), 361–393.
- Rausche, F. (2015). The case method and the pile driving analyzer® (PDA) & PDPI June 2015 – PDA and case method. 2015 Pile Dynamics, Inc.
- Sawant, V. & Shukla, Sanjay & Sivakugan, Nagaratnam & Das, B. (2013). Insight into pile set-up and load carrying capacity of driven piles. International Journal of Geotechnical Engineering. 7. 71-83. 10.1179/1938636212Z.0000000004.
- Seed, H. B. and Reese, L.C. 1955. ‘The action of soft clay along friction piles’, Proc. American Society of Civil Engineers 81, Paper 842.
- Soderberg, L. O. (1961). Consolidation theory applied to foundation pile time effects. Geotechnique, 11, (3), 217–225.
- Stuart C. J., Sandford T. C., Set-up Factors for Driven Piles Through the Presumpscot Formation, 2015 Symposium on the Presumpscot Formation, Portland, ME.
- Tomlinson, M. J. (1986). Foundation design and construction (5th edition). Singapore: ELBS.
- Tomlinson, M., Woodward, J., (2008). Pile design and construction practice. 5th Edition.
- Yang, N. C., (1970). Relaxation of piles in sand and inorganic silt. J. Soil Mech. Found. Div., 96, 395–409.
- Wang, Z., Zhao, C., Zhang, W. (2023). Multi-objective design and optimization of squeezed branch pile based on orthogonal test. Scientific Reports, 13(1) <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49936-y>